مهندسی صنایع و مدیریت شریف، (زمستان ۱۳۹۶)
دوره‌ی ۱-۳۳، شماره‌ی ۲/۲، ص. ۵۱-۶۲

Original Article

تعیین ترکیب بهینه‌ی ناوگان و مسیریابی دوره‌یی شناورهای پشتیبانی در زنجیره‌ی تأمین تأسیسات دریایی نفت‌وگاز با درنظرگرفتن تحویل و بارگیری هم‌زمان

حسین ایزدطلب (کارشناس ارشد)
علی شاهنده* (دانشیار)
مهدی علینقیان (استادیار)
دانشکده‌ی مهندسی صنایع، دانشگاه صنعتی اصفهان

بسیاری از تأسیسات نفت‌وگاز در دریاها واقع شده‌اند که به شبکه‌ی پشتیبانی قابل اعتماد و مؤثر برای حمل کالاها و اقلام از انبار پشتیبانی به تأسیسات دریایی نیاز دارند. مسئله‌ی برنامه‌ریزی شناورهای پشتیبانی یک مسئله‌ی حمل‌ونقل دریایی است که شامل مشخص‌کردن ترکیب بهینه‌ی ناوگان، سفرها و زمان‌بندی مربوط به آنها به‌منظور پشتیبانی تعداد مشخصی از تأسیسات دریایی است.
در این پژوهش در راستای برنامه‌ریزی مناسب شناورهای پشتیبانی مطابق با شرایط دنیای واقعی ویژگی‌هایی مانند جریان برگشتی و امکان جابه‌جایی محموله‌ها بین تأسیسات دریایی ملاحظه و یک روش حل دقیق ــ الف) تولید سفر و ب) حل یک مدل عدد صحیح بر پایه‌ی سفرهای تولیدشده ــ ارائه شده است. به‌منظور حل ابعاد بزرگ یک الگوریتم جست‌وجوی ممنوعه و یک روش حل ابتکاری ارائه شده است.

واژگان کلیدی: حمل‌ونقل دریایی، مسیریابی دوره‌یی، تعیین ناوگان بهینه، تحویل و بارگیری هم‌زمان، جست‌وجوی ممنوعه.

hossein.izedtalab@yahoo.com
ali-nook@cc.iut.ac.ir
alinaghian@cc.iut.ac.ir

۱. مقدمه

بسیاری از تأسیسات تولید و استخراج نفت‌وگاز در دریاها واقع شده‌اند که به شبکه‌ی پشتیبانی قابل اعتماد و مؤثر نیاز دارند. این شبکه‌ی پشتیبانی آماد (لجستیک) بالادست صنعت نفت‌وگاز شناخته می‌شود. آماد بالادست (شکل ۱) یک شبکه‌ی آماد پیچیده شامل عملیات‌های اکتشاف و حفاری و استخراج سرچاه (شامل سکوها، دکل‌های عملیاتی، تأسیسات و شناورهای خاص)، عملیات‌های انتقال محموله‌ها (از طریق اسکله‌ها، مخازن، شناورها، کامیون‌ها، فرودگاه‌ها و بالگردها) و انتقال نیروی انسانی (به‌وسیله‌ی بالگرد و قایق) است.[۱]

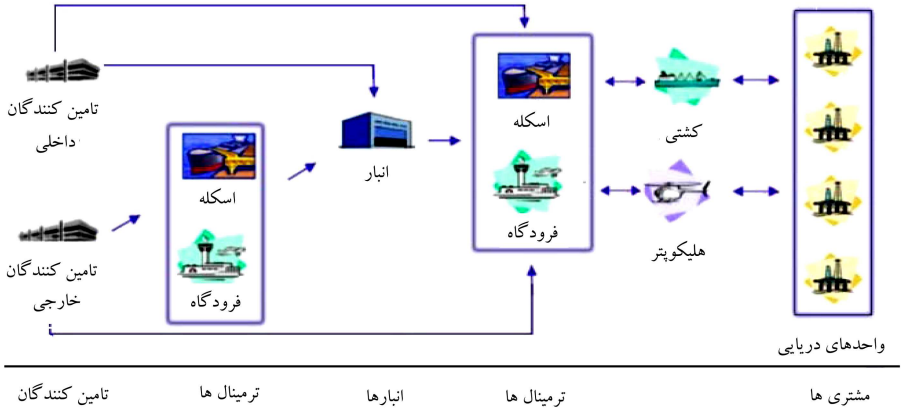
مسئله‌ی برنامه‌ریزی شناورهای پشتیبانی (SVPP)[۱] شامل تعیین ترکیب بهینه‌ی ناوگان از شناورهای پشتیبانی و مشخص‌کردن هم‌زمان مسیرهای هفتگی و زمان‌بندی برای این شناورهاست. مسیر[۲] در این تعریف ترکیبی از یک یا چند سفر است که یک شناور در مدت یک هفته انجام می‌دهد و از یک انبار پشتیبانی مشترک شروع می‌شود و به همان انبار برمی‌گردد. در طول یک سفر، شناورها ممکن است به یک یا چند واحد دریایی خدمات ارائه کنند.[۲]

با توجه به اینکه شناورهای موجود در شبکه هزینه‌ی زیادی دارند (هزینه‌ی ثابتی معادل ۱۰۰۰۰ تا ۲۵۰۰۰ دلار در روز)، مشخص‌کردن تعداد بهینه‌ی شناورها برای تأمین شبکه‌تصمیمی راهبردی است که برنامه‌ریزی مناسب آن می‌تواند صرفه‌جویی زیادی برای زنجیره در پی داشته باشد. هدف اصلی در این مسئله کمینه‌کردن هزینه‌هاست؛ ضمن آنکه به‌طور هم‌زمان خدمات پشتیبانی باید قابل اعتماد بماند. در اینجا هزینه‌ها شامل هزینه‌ی اجاره‌ی شناورهای پشتیبانی و هزینه‌ی شناوررانی است.

در این مسئله اقلام و کالاها از اسکله‌ی پشتیبانی بارگیری و به واحدهای دریایی تحویل داده می‌شوند و اقلامی نیز از واحدهای دریایی به اسکله‌ی پشتیبانی بازگردانده می‌شود که ممکن است از مقدار تحویل‌دهی بیشتر باشد. همچنین، به بارگیری از یک واحد دریایی و تحویل به واحد دریایی دیگر نیاز است؛ به‌طوری‌که بخشی از تقاضای یک واحد دریایی در یک دوره از واحد دریایی دیگری تأمین می‌شود. این موضوع از ویژگی‌های عملیاتی مسئله است که در مطالعات پیشین به آن توجه نشده است. نوآوری‌های مقاله عبارت‌اند از:

ــ بررسی و شناسایی محدودیت‌های عملیاتی مسئله‌ی برنامه‌ریزی شناورهای

* نویسنده مسئول
تاریخ: دریافت ۱۳۹۴/۳/۴، اصلاحیه ۱۳۹۴/۹/۲۶، پذیرش ۱۳۹۴/۱۲/۲۵.



شکل ۱. آماد بالادست صنعت نفت‌وگاز.[۳]

پشتیبانی مانند: جریان برگشتی و امکان بارگیری از یک مشتری و تحویل به مشتری دیگر؛

- ارائه‌ی روش حل دقیق برای ابعاد متوسط مسئله؛
- الگوریتم جست‌وجوی ممنوعه: الگوریتم ارائه‌شده دارای ساختار ساده‌یی است و در آن از رویکردی نو استفاده شده است. رشته‌یی که برای جواب تعریف شده است، به‌طور ساده‌یی کل فضای جواب را پوشش می‌دهد و می‌تواند در مسائل فراوانی در زمینه‌ی تعیین اندازه‌ی ناوگان، مسیریابی دوره‌یی و مسیریابی به کار برود؛
- روش ابتکاری ارائه‌شده در ابعاد بزرگ مسئله کارایی مناسبی دارد و زمان حل مسئله را به‌طور چشم‌گیری کاهش داده است.

در ادامه‌ی مقاله در بخش دوم مرور پیشینه، بخش سوم روش حل دومرحله‌یی، بخش چهارم و پنجم الگوریتم فرااابتکاری جست‌وجوی ممنوعه و ابتکاری، بخش ششم نتایج عددی و در انتها نتیجه‌گیری و پیشنهاد برای تحقیقات آتی بیان خواهد شد.

۲. مرور پیشینه

در سال‌های اخیر در حوزه‌ی مطالعاتی لجستیک دریایی[۳] جذابیت‌های تحقیقاتی افزایش یافته و مطالعاتی درکشورهای پیشرفته‌ی صاحب نفت، که تأسیسات نفتی آنها در دریا واقع شده، صورت گرفته است که نشان‌دهنده‌ی اهمیت کاربردی آن‌هاست. در ادامه به بیان ویژگی‌های مسئله و پیشینه‌ی پژوهش‌ها پرداخته می‌شود.

۱.۲. ویژگی‌ها و فرضیات مسئله

مسئله‌ی برنامه‌ریزی شناورهای پشتیبانی به مسئله‌ی شناخته‌شده‌ی مسیریابی وسایل نقلیه (VRP)[۴] شباهت زیادی دارد. مسئله‌ی VRP یافتن k مسیر با کمترین هزینه است به‌طوری‌که هر مشتری دقیقاً یک‌بار ملاقات شود و هر مسیر از انبار شروع و به آن نیز ختم شود؛ ضمناً مجموع تقاضای مشتریانی که توسط یک وسیله خدمت‌رسانی می‌شوند نباید از ظرفیت آن وسیله تجاوز کند.[۴]

اگر به مسئله‌ی مسیریابی وسایل نقلیه (VRP) محدودیت‌های زیر اضافه شود، مسئله‌ی مورد مطالعه حاصل می‌شود: افق زمانی دوره‌یی[۵]، پنجره‌ی زمانی[۶]، محدودیت ظرفیت وسایل حمل‌ونقل (شناورها)، امکان بارگیری از یک مشتری به‌منظور برآوردن بخشی از تقاضای مشتری دیگر، ناوگان غیرمشابه[۷]، تحویل و بارگیری همزمان[۸]، نیاز به بیش از یک بازدید در یک دوره، تخصیص بیش از یک سفر به یک وسیله‌ی حمل در یک دوره، امکان ادامه یافتن یک سفر بیش از یک روز و توزیع یکنواخت حرکت‌ها[۹].

در ادامه به شرح تعدادی از این محدودیت‌ها و ویژگی‌های عملیاتی مسئله پرداخته می‌شود:

- در این مسئله اقلام و کالاها از اسکله‌ی پشتیبانی بارگیری و به واحدهای دریایی تحویل داده می‌شوند و اقلامی نیز از واحدهای دریایی به اسکله پشتیبانی بازگردانده می‌شوند. هم‌چنین، در بعضی مواقع نیاز به بارگیری از یک واحد دریایی و تحویل به واحد دریایی دیگر است؛ به‌طوری‌که بخشی از تقاضای یک واحد دریایی در یک دوره از واحد دریایی دیگر تأمین می‌شود. مثلاً اقلامی مانند مته، کیسینگ، سیمان و سایر تجهیزات بر روی یک سکو قرار دارد و به‌دلایلی مانند موجود نبودن در انبار یا اتمام عملیات بر روی سکو و نیاز به آنها در سکویی دیگر لازم است که این اقلام از یک سکو به سکوی دیگر جابه‌جا شوند.
- اسکله‌ی پشتیبانی و تأسیسات دریایی ممکن است در محدوده‌یی از طول روز فعالیت[۱۰] داشته باشند. در طول این زمان آنها می‌توانند تخلیه و بارگیری شناورها را انجام دهند. هر اسکله‌ی پشتیبانی به‌طور معمول در ساعت اداری رسمی (۸ تا ۱۶) خدمت‌رسانی می‌کند. در تأسیسات نیز ممکن است واحد تخلیه و بارگیری در شب (بین ساعات ۱۹ تا ۷) غیرفعال باشد. زمان بازگشت شناورها به اسکله نیز مطابق با زمان باز بودن اسکله است.[۲]
- ظرفیت اسکله‌ی پشتیبانی به‌صورت تعداد شناورهایی است که می‌توانند به‌طور همزمان در اسکله پهلو بگیرند و برای سفر آماده شوند. این تعداد ممکن است در طول هفته متفاوت باشد.[۲]
- هر شناور پشتیبانی ویژگی‌های مشخصی از قبیل ظرفیت عرشه، ظرفیت بالک[۱۱]، سرعت شناوررانی و نرخ اجاره دارد. ظرفیت عرشه برای شناورها بین ۶۰۰ تا ۱۱۰۰ متر مربع و ظرفیت بالک از ۴۰۰۰ تا ۸۰۰۰ تن متفاوت است. با توجه به تجارب گذشته در بیشتر موارد ظرفیت عرشه یک محدودیت محسوب می‌شود؛ بنابراین، تقاضای واحدهای دریایی و ظرفیت شناورها برحسب مترمربع (سطح مقطع تقاضا و سطح مقطع عرشه) بیان می‌شود. معمولاً تقاضای واحدهای دریایی به‌صورت هفتگی تخمین زده می‌شود. ضمناً به هر واحد دریایی (به‌دلایل

عملیاتی یا محدودیت ظرفیت ذخیره‌سازی) تعداد مشخصی بازدید در طول هفته اختصاص داده می‌شود. بنابراین، تقاضا برای هر ملاقات با تقاضای هفتگی تقسیم بر تعداد بازدیدها برابر است.[۲]

ـ ممکن است تقاضایی خارج از برنامه‌ریزی برای یک سکو رخ دهد. حال درصورتی‌که فاصله‌ی زمانی دو بازدید متوالی برای مشتریان طولانی باشد واحد پشتیبانی ناچار است برای پاسخ به تقاضا از بالگرد استفاده کند که هزینه‌ی زیادی در پی خواهد داشت؛ بدین منظور لازم است حرکت شناورها از اسکله‌ی پشتیبانی به مقصد واحدهای دریایی در طول هفته به طور یکنواخت توزیع شود. مثلاً اگر یک واحد دریایی سه بازدید در هفته نیاز داشته باشد و این سه بازدید (حرکت از انبار) در سه روز متوالی انجام گیرد در صورت انجام درخواست دیگری پس از آخرین حرکت، زودترین حرکت بعدی از اسکله به مقصد آن واحد دریایی حداقل ۴ روز بعد خواهد بود.[۲]

۲.۲. مسئله‌ی ترکیب ناوگان

مسئله‌ی ترکیب ناوگان تصمیمی راهبردی است که بر تعیین نوع و تعداد بهینه‌ی ناوگان حمل تمرکز دارد. مدل‌های این مسائل با توجه به مشخصه‌های فنی وسایل حمل مثل ظرفیت و سرعت، هزینه‌های ثابت و عملیاتی آن‌ها و نیازهای سیستم یک ترکیب بهینه از وسایل حمل (نوع و تعداد) را مشخص می‌کند. همان‌طورکه کریستینسن و همکاران بیان کرده‌اند بیشتر این مدل‌ها شامل تصمیمات مسیریابی هستند. زیرا در نظر گرفتن ساختار اساسی برنامه‌ریزی عملیاتی در این مسائل ضروری است.[۵] این دسته از مسائل به‌عنوان مسائل اندازه‌ی ناوگان و مسیریابی وسایل حمل (FSMVRP)[۱۲] شناخته می‌شوند. تحقیق گلدن و همکاران از اولین مطالعات درباره‌ی FSMVRP است که یک مدل ریاضی برای مسئله ارائه و چند روش ابتکاری برای حل آن پیشنهاد کرده‌اند.[۶] اولین بار فاگرهولت مسئله‌ی ترکیب ناوگان را در صنعت حمل‌ونقل دریایی مطرح کرده است.[۷] مروری بر پیشینه شامل مسائل ترکیب ناوگان و مسیریابی در حمل جاده‌یی و دریایی توسط هاف و همکاران ارائه شده است. این مطالعه در مجموع ۱۲۰ مقاله را، که ترکیبی از تعیین ناوگان و مسیریابی هستند، بررسی و یک مدل ریاضی پایه برای این دسته از مسائل ارائه کرده است.[۸] سون‌پارچا و همکاران پیشینه‌ی مطالعات در زمینه‌های اندازه‌ی ناوگان و مسیریابی وسایل حمل، مسیریابی وسایل حمل با ناوگان غیرمشابه (HFVRP)[۱۳] ارائه و گسترش‌های این مسائل و مطالعات جدید در این حوزه را بررسی کرده‌اند.[۹]

۳.۲. مسئله‌ی مسیریابی دوره‌یی وسایل نقلیه (PVRP)

مسئله‌ی مسیریابی دوره‌یی وسایل نقلیه (PVRP) به بیان فرانسیس و همکاران به‌صورت مسیریابی وسایل حمل که دوره‌ی عملیات می‌تواند بیشتر از یک روز باشد، تعریف شده است.[۱۰] این مسئله شامل خدمت‌رسانی به مشتری‌ها در طول یک دوره که هر مشتری می‌تواند بیشتر از یک بار بازدید شود، تخصیص بازدیدها به وسایل حمل و بهینه‌کردن مسیر هر وسیله‌ی حمل است. کاربرد گسترده و تنوع زیاد مسائل به همراه پیچیدگی مسئله منجر به ایجاد جریان وسیعی از مطالعات در بیان کاربردها و روش‌های حل PVRP شده است. از کاربردهای گسترده‌ی این مسئله می‌توان به جمع‌آوری مواد قابل بازیافت، زباله، شیر، نفت، تولیدات کارخانه‌ها، کتاب‌های کتابخانه و تحویل کالاهای فروشگاه‌ها، فرآورده‌های خونی، کتاب‌های کتابخانه و همچنین مسیریابی خدمات حمل کارشناسان تعمیرات و نگهداری، مسیریابی پرستاران در زنجیره‌ی مراقبت‌های پزشکی خانگی و... اشاره کرد.

اولین بار بلترامی و بودین، PVRP را برای مسیریابی وسایل جمع‌آوری زباله معرفی کردند.[۱۱] از آن پس مطالعات زیادی در این زمینه صورت گرفته است و همچنان این مطالعات ادامه دارد. کمپل و ویلسون کاربردها و روش‌های حل PVRP در چهل سال اخیر را مرور و بررسی کرده‌اند.[۱۲]

۴.۲. بارگیری و تحویل هم‌زمان

موضوع این پژوهش از جهتی شبیه مسئله‌ی مسیریابی وسایل حمل‌ونقل با تحویل و بارگیری هم‌زمان و پنجره‌ی زمانی (VRPSDPTW) است که هوکی[۱۴] معرفی کرده است. در این مسئله اقلام و کالاها از اسکله‌ی پشتیبانی (انبار) بارگیری و به واحدهای دریایی (مشتری‌ها) تحویل داده می‌شوند و ضمناً اقلامی نیز از واحدهای دریایی به‌عنوان جریان برگشتی بارگیری و به اسکله‌ی پشتیبانی برگشت داده می‌شوند. در مسئله‌ی کلاسیک VRPSDPTW همه‌ی کالاهایی که باید تحویل داده شوند از انبار بارگیری و همه‌ی کالاهایی که در زنجیره بارگیری می‌شوند به انبار تحویل داده می‌شوند.[۱۳] علاوه‌بر این در مسئله‌ی پیش رو کالاها می‌توانند از یک واحد دریایی بارگیری و به واحد دریایی دیگر تحویل داده شوند. از این جهت نیز شبیه محدودیت Pairing and precedence در مسئله‌ی بارگیری و تحویل (PDP) است که برای هر درخواست از طرف مشتری یک مبدأ و مقصد تعریف می‌شود و مبدأ الزاماً باید پیش از مقصد بازدید شود.

با بررسی مسئله از دیدگاه بارگیری و تحویل کالاها مسئله‌ی مورد مطالعه به دو زیر بخش از مسائل VRP مربوط می‌شود.

الف) مسیریابی وسایل حمل‌ونقل با تحویل و بارگیری همزمان و پنجره‌ی زمانی (VRPSDPTW)[۱۵]. کالاها توسط یک ناوگان از وسایل حمل، بین انبار و مشتری‌ها در طی پنجره‌ی زمانی مربوط به آن‌ها حمل می‌شوند.

ب) مسئله‌ی تحویل و بارگیری با پنجره‌ی زمانی (PDPTW)[۱۶] کالاها بین n محل بارگیری و n محل تحویل در طی پنجره‌ی زمانی مربوط به آن‌ها حمل می‌شوند.

باوجود شمار زیاد مطالعات انجام‌شده درباره‌ی VRPSDPTW و PDPTW تنها ران لیو و همکاران در تحقیق خود هر دو راهبرد، الف) حمل کالاها از انبار به مشتری‌های و بازگرداندن کالاها از مشتری‌ها به انبار، ب) حمل و جابه‌جایی کالاها بین موقعیت بارگیری (مبدأ) و موقعیت تحویل (مقصد) را به‌طور هم‌زمان در نظر گرفته‌اند. آن‌ها مسئله‌ی زمان‌بندی وسایل در زنجیره‌ی مراقبت‌های پزشکی خانگی[۱۷] را بررسی کرده‌اند که شامل تحویل دارو و تجهیزات پزشکی از کارخانه‌ی داروسازی به بیماران در منزل، تحویل داروهای خاص از بیمارستان به محل سکونت بیماران، برداشتن نمونه آزمایش‌ها از بیماران و تحویل به بیمارستان و جمع‌آوری داروهای استفاده‌نشده و تجهیزات پزشکی از بیماران و تحویل آن‌ها به انبار کارخانه است. آن‌ها برای این مسئله دو مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح (MIP) ارائه و سپس یک الگوریتم ژنتیک و یک الگوریتم جست‌وجوی ممنوعه برای حل آن ارائه داده‌اند.[۱۴]

در مسئله‌ی برنامه‌ریزی شناورهای پشتیبانی مورد مطالعه نیز هر دو راهبرد حمل کالاها و اقلام از اسکله‌ی پشتیبانی به واحدهای دریایی و نیز بارگیری کالاها از یک واحد دریایی و تحویل به واحد دریایی دیگر مطرح است. هر دو مسئله VRPSDPTW و PDPTW، NP hard هستند[۱۴] و مسئله‌ی مورد مطالعه

که ترکیبی از هر دو مسئله است نیز NP hard است. ونگ و همکاران و کای و همکاران برای مسئله‌ی مسیریابی وسایل نقلیه به‌همراه تحویل و بارگیری هم‌زمان و پنجره‌ی زمانی، الگوریتم فراابتکاری ارائه داده‌اند.[۱۵و۱۶]

۵.۲. مسئله‌ی برنامه‌ریزی شناورهای پشتیبانی

اولین مطالعه درباره‌ی برنامه‌ریزی شناورهای پشتیبانی مربوط به پژوهش فاگرهولت و لینداستد است که عملیات پشتیبانی در دریای نروژ را به درخواست شرکت استت‌اویل[۱۸] بررسی کرده‌اند.[۱۷] پس از آن مطالعات دیگری در این حوزه صورت گرفته است که می‌توان به مقاله‌ی آس و همکاران درباره‌ی مسیریابی برای یک شناور پشتیبانی و مقاله‌ی رابرت ایچان و همکاران درباره‌ی عملیات پشتیبانی تأسیسات موجود در منطقه‌ی کمپس بیسن[۱۹] برزیل اشاره کرد.[۱۸و۱] آس و همکاران شناورهای پشتیبانی در زنجیره‌ی تأمین تأسیسات دریایی را یک منبع پرهزینه دانسته‌اند. تمرکز آن‌ها بر روی تحلیل طراحی شناورهای پشتیبانی برای بهبود عملیات پشتیبانی بوده است.[۱۹]

هالورسن و همکاران به درخواست شرکت استت‌اویل در یک مطالعه مسئله‌ی تعیین یک ناوگان بهینه از شناورهای پشتیبانی دریایی و مسیریابی هفتگی شناورها و زمان‌بندی آنها را بررسی کرده‌اند. از جمله کاستی‌های این پژوهش لحاظ‌نکردن جریان‌های برگشتی در محاسبات و عدم امکان بارگیری از یک دکل عملیاتی و تحویل به دکل دیگر است. شایشو و همکاران یک الگوریتم جست‌وجوی همسایگی گسترده‌ی ابتکاری با توانایی حل مسئله در ابعاد بزرگ را با محدودیت‌های مدل هالورسن و همکاران ارائه دادند.[۲۰]

مایسیوک و گریبکواسکایا با توجه به عدم قطعیت زمان شناوررانی و خدمت‌رسانی ناشی از شرایط آب و هوایی، یک مدل شبیه‌سازی گسسته پیشامد[۲۰] برای ارزیابی تعیین اندازه‌ی ناوگان شناورهای پشتیبانی در یک دوره‌ی یک‌ساله ارائه کرده‌اند.[۲۱] ساپوت و گریبکواسکایا مسیریابی یک شناور در شبکه‌ی پشتیبانی تأسیسات دریایی را بررسی کرده‌اند که در آن هر مشتری به بارگیری و تحویل چندین کالا از یک انبار پشتیبانی نیاز دارد.[۲۲] میلاکویک و همکاران با استفاده از شبیه‌سازی ترکیب بهینه‌ی ناوگان شناورهای پشتیبانی دریایی در شبکه‌ی لجستیک بالادست نفت‌وگاز قطبی[۲۱] را با توجه به شرایط عدم قطعیت و فواصل طولانی بررسی کرده‌اند.[۲۳] کریستینسن و همکاران مسیریابی و زمان‌بندی یک ناوگان از شناورهای پشتیبانی سوخت[۲۲] را بررسی کرده‌اند. این مطالعه مسئله‌ی عملیاتی شرکت نفت هلنیک[۲۳] در سوخت‌رسانی به مشتریان در دریا را بررسی و یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح برای آن ارائه کرده است.[۲۴]

۳. روش حل دو مرحله‌یی

روش حل ارائه‌شده شامل دو مرحله است: الف) تولید تمام سفرهایی که ممکن است شناورها شناوررانی کنند. ب) حل مدل بر پایه‌ی سفرهای تولیدشده در مرحله‌ی اول.

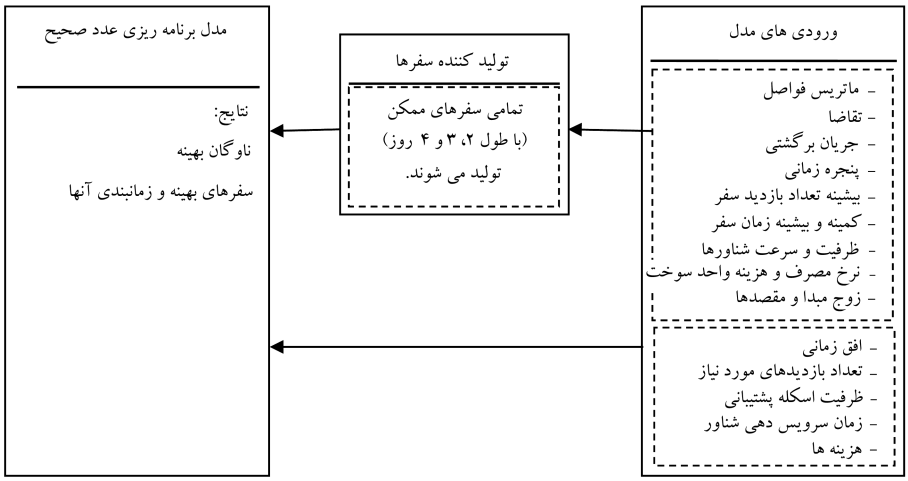
ایده‌ی روش حل دو مرحله‌یی اولین بار در مطالعه‌ی فاگرهولت و لینداستد برای مسئله‌ی SVPP مطرح شده است.

طرح‌واره‌یی از روش حل در شکل ۲ نشان داده شده است. همان‌گونه که در شکل مشخص است تعدادی از داده‌ها به‌عنوان ورودی به مرحله‌ی اول (تولید سفرها) و سپس خروجی مرحله‌ی اول به همراه سایر داده‌ها در مرحله‌ی دوم (مدل عدد صحیح بر پایه‌ی سفرها) به‌کار برده می‌شوند و جواب نهایی شامل ناوگان بهینه، سفرهای بهینه و زمان‌بندی مربوط به آن‌هاست.

۱.۳. تولید سفرها

در این مرحله برای تولید همه‌ی سفرهای ممکن، تمام زیرمجموعه‌های تأسیسات دریایی تعریف می‌شوند. اندازه‌ی زیرمجموعه‌ها (تعداد مشتری‌هایی که در یک سفر بازدید می‌شوند) به‌وسیله بیشینه‌ی تعداد بازدیدها در هر سفر و ظرفیت بزرگ‌ترین شناور محدود می‌شود. سپس برای هر زیرمجموعه، مسئله‌ی فروشنده‌ی دوره‌گرد (TSP)[۲۴] با پنجره‌ی زمانی حل می‌شود. پنجره‌ی زمانی در این مسئله، پنجره‌ی زمانی سخت است و اگر شناورها خارج از پنجره‌ی زمانی به دکل عملیاتی برسند باید تا زمان فعالیت مجدد واحد بارگیری و تخلیه منتظر بمانند. ماتریس فواصل از ورودی‌های این مرحله است. سرعت شناورهای پشتیبانی ممکن است در طول سفر با توجه به شرایط آب و هوایی، وزن شناور و تأخیر از برنامه‌ی زمان‌بندی متفاوت باشد. اما هر شناور یک سرعت به‌عنوان سرعت خدمت‌رسانی در شرایط معمولی دارد که در محاسبه‌ی زمان سفر به‌کار برده می‌شود. هزینه‌ی هر سفر به‌صورت حاصل‌ضرب مصرف سوخت و هزینه‌ی واحد سوخت محاسبه می‌شود. در این مطالعه دو نرخ مصرف سوخت در زمان شناوررانی و در زمان انتظار یا خدمت‌رسانی به تأسیسات در نظر گرفته می‌شود. از آنجا که ابعاد مسئله‌ی TSP حاضر محدود است، TSP به‌صورت شمارش کامل قابل حل است. در حل TSP، تمام توالی‌های ممکن از هر زیرمجموعه‌ی تولیدشده با یکدیگر مقایسه می‌شوند. هر توالی شامل دو مشخصه‌ی زمان و هزینه است، معیار اول انتخاب، زمان است (برحسب روز) و در صورت منحصربه‌فرد نبودن از میان آن‌ها کم‌هزینه‌ترین انتخاب می‌شود. مدت زمان هر سفر به‌این صورت محاسبه می‌شود: شناور ساعت ۸ صبح در اسکله‌ی پشتیبانی حضور دارد و طی هشت ساعت خدمات لازم شامل تخلیه و بارگیری شناور در این مدت انجام و آماده سفر می‌شود. بنابراین، ساعت آغاز حرکت از اسکله‌ی پشتیبانی ساعت ۱۶ در نظرگرفته و هشت ساعت به زمان کل اضافه می‌شود. شناور سفر خود را از اسکله‌ی پشتیبانی آغاز و مدت زمان شناوررانی تا رسیدن به تأسیسات دریایی اول با استفاده از فاصله و سرعت شناور محاسبه و به زمان کل اضافه می‌شود. اگر خارج از پنجره‌ی زمانی به مشتری رسیده باشد، زمان انتظار تا باز شدن واحد تحویل و بارگیری به زمان کل اضافه می‌شود و اگر در پنجره‌ی زمانی مشخص‌شده به تأسیسات مورد نظر برسد و عملیات تخلیه و بارگیری قبل از بسته‌شدن واحد مربوط انجام شود، زمان خدمت‌رسانی به زمان کل اضافه می‌شود اما اگر عملیات تخلیه و بارگیری تا پایان ساعت فعالیت به پایان نرسد، ۱۲ ساعت انتظار به زمان کل افزوده می‌شود. سپس زمان شناوررانی تا تأسیسات دریایی دوم محاسبه و به‌همراه زمان خدمت‌رسانی و زمان انتظار به زمان کل اضافه می‌شود. این روال تا زمانی که شناور به اسکله‌ی پشتیبانی بازگردد ادامه می‌یابد. با توجه به اینکه اسکله‌ی پشتیبانی معمولاً در ساعات اداری رسمی (۸ الی ۱۶) فعال است و به شناورها خدمت‌رسانی می‌کند و زمان خدمت‌رسانی برای هر شناور (زمان آماده‌شدن شناور برای شروع سفر جدید) هشت ساعت فرض شده است، برای اینکه شناور بتواند در آن روز سفر خود را آغاز کند باید در ساعت ۸ صبح در اسکله‌ی پشتیبانی باشد در غیر این‌صورت سفر در روز بعد آغاز می‌شود. بنابراین، مدت زمان سفرها به روز محاسبه و ساعات اضافی که به طول سفر اضافه می‌شود مربوط به انتظار در اسکله‌ی پشتیبانی است.

محدودیت مربوط به ظرفیت شناورها در همین مرحله لحاظ می‌شود. ظرفیت



شکل ۲. طرح‌واره‌ی روش حل.

مورد نیاز هر سفر نیز به‌این‌صورت محاسبه می‌شود که در ابتدا مجموع نیاز تأسیساتی که باید در این سفر بازدید شود، محاسبه می‌شود و به‌عنوان ظرفیت اولیه در نظرگرفته می‌شود. در بررسی هر توالی در TSP پس از رسیدن به هر دکل مقدار تقاضای آن دکل از ظرفیت اولیه کسر و جریان برگشتی به آن اضافه می‌شود. این مقدار پس از هر بازدید ملاحظه و بیشترین مقدار آن در یک سفر برابر با ظرفیت مورد نیاز شناور برای انجام این سفر در نظرگرفته می‌شود.

پس از تولید سفرهای معمولی برای بزرگ‌ترین شناور سفرهای مربوط به بارگیری از یک موقعیت و تحویل در موقعیت دیگر تولید می‌شود. بدین‌صورت‌که امکان بارگیری از یک دکل عملیاتی برای برآوردن تقاضای دکل دیگر در همان دوره فراهم شود. دکلی که در حال حاضر محموله بر روی آن قرار دارد مبدأ و دکلی که محموله باید به آن حمل شود مقصد نامیده می‌شود. به‌منظور تولید این سفرها از میان سفرهای تولیدشده‌ی معمولی آنهایی که هر دو دکل مبدأ و مقصد در آن وجود دارند، انتخاب می‌شوند. سپس TSP برای آن‌ها با شرط اینکه مبدأ زودتر از مقصد بازدید شود حل می‌شود و به مجموعه‌ی سفرهای شناور بزرگ‌تر و مجموعه‌ی سفرهای مربوط به مبدأ و مقصد اضافه می‌شود. زمان سفر مشابه قبل است و در TSP محاسبه می‌شود. اما به‌منظور محاسبه‌ی ظرفیت مورد نیاز سفر، ظرفیت اولیه به‌صورت مجموع نیازهای تأسیساتی که باید بازدید شوند منهای مقدار جابه‌جایی بین مبدأ و مقصد در نظرگرفته می‌شود و سپس مشابه حالت قبل ادامه می‌یابد.

پس از آنکه سفرها برای بزرگ‌ترین شناور تولید شدند، ظرفیت مورد نیاز هر سفر با ظرفیت شناورهای موجود دیگر مقایسه و اگر از ظرفیت شناور تجاوز نکنند به مجموعه سفرهای آن شناور اضافه می‌شوند. در نهایت تمام سفرهای ممکن برای هر شناور و سفرهای مربوط به هر مبدأ و مقصد تولید شده‌اند و به‌عنوان یکی از ورودی‌های مرحله‌ی دوم به مدل عدد صحیح وارد می‌شوند. در جدول ۱ شبه کد الگوریتم تولید سفر ارائه شده است.

۲.۳. مرحله‌ی دوم مدل بر اساس سفر

مدل براساس سفر[25] یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح است که مسئله‌ی برنامه‌ریزی شناورهای پشتیبانی را با انتخاب بهترین شناورها از نظر هزینه و بهترین سفرها از سفرهای از پیش تولیدشده‌ی مرحله اول که از محدودیت‌ها تجاوز نمی‌کند، حل می‌کند.

الف) فرمول‌بندی مسئله

نمادها

V: مجموعه‌ی شناورهای پشتیبانی در دسترس برای اجاره، که با اندیس v نشان داده می‌شود $(v = ۱, ..., nV)$؛

N: مجموعه‌ی تأسیسات دریایی موجود در شبکه، که با اندیس i نشان داده می‌شود $(i = ۱, ..., n)$؛

$N۲ \subseteq N$: مجموعه‌ی تأسیسات دریایی که دو بازدید در دوره نیاز دارند. $N۳, N۴, N۵$ به‌صورت مشابه مجموعه‌ی تأسیساتی هستند که به‌ترتیب به ۵، ۴ و ۳ بازدید در هر دوره نیاز دارند؛

$dp \subseteq N$: مجموعه‌ی تأسیساتی که حداقل در یک بازدید بخشی از نیاز آنها از تأسیسات دیگری تأمین می‌شود؛

R: مجموعه‌ی تمام سفرهای تولیدشده، که با اندیس r نشان داده می‌شود $(r = ۱, ..., nR)$؛

$R_v \subseteq R$: مجموعه‌ی سفرهای تولیدشده برای شناور v؛

$R_{vl} \subseteq R_v$: مجموعه‌ی گزینه‌های سفر با طول l برای شناور v؛

$R_{dp} \subseteq R$: مجموعه‌ی گزینه‌های سفر به‌منظور برآوردن نیاز تأسیسات مقصد از تأسیسات مبدأ؛

T: مجموعه‌ی روزهای افق زمانی (یک هفته)، که با اندیس t نشان داده می‌شود $(t = ۱, ..., nT)$؛

L: مجموعه‌ی سفرهای ممکن با مدت زمان مشخص برحسب روز، که با اندیس l نشان داده می‌شود $(l = ۲, ۳, ۴)$.

پارامترها

C_v^{rc}: هزینه‌ی هفتگی اجاره‌ی شناور v؛

C_{vr}^{sc}: هزینه‌ی شناوررانی و خدمت‌رسانی برای سفر r توسط شناور v؛

D_{vr}: طول سفر r توسط شناور v بر حسب روز؛

F_v: تعداد روزی از دوره که شناور v قابل استفاده است. (ممکن است به دلایلی مانند تعمیرات و نگهداری در هر دوره یک یا چند روز شناور برای شناوررانی در دسترس نباشد)؛

S_i: تعداد بازدید مورد نیاز تأسیسات دریایی i در طول دوره؛

$S_{dp(i)} \leq S_i, i \in dp$: تعداد بازدید مورد نیاز تأسیسات دریایی $i \in dp$ در طول دوره که بخشی از نیاز تأسیسات مبدأ بارگیری می‌شود؛

جدول ۱. شبه کد الگوریتم تولید سفر.

Voyage generation procedure

Create sets of vessels (Vessel Set) with equal sailing speed

For all Vessel Set

Find vessel in Vessel Set with largest loading capacity, vessel Max

Enumerate all sets of installations (Installation Set) that fulfill minimum and maximum requirements on number of installations in a voyage and their demands does not exceed the capacity of vessel Max

For all Installation Set

Find a voyage by solving a traveling salesman problem with time windows starting and ending at the supply depot where all installations in Installation Set are visited exactly once

If voyage does not violate minimum and maximum duration requirements **and** does not exceed the capacity of vessel Max

Add voyage to Voyage Set for vessel Max (Voyage Set[vessel Max])

End If

End For all Installation Set

For all start point and destination pair

For all Installation Set

If set includes start point and destination, (Installation Set)

Find a voyage by solving a traveling salesman problem with time windows starting and ending at the supply depot where all installations in Installation Set are visited exactly once when start point is visited before destination

End if

If voyage does not violate minimum and maximum duration requirements **and** does not exceed the capacity of vessel Max

Add voyage to Voyage Set for vessel Max (Voyage Set[vessel Max])

Add voyage to voyage Set for start point and destination pair (Voyage Set pair of locations)

End if

End For all start point and destination pair

For all vessels in Vessel Set not vessel Max

For all voyages in Voyage Set[vessel Max]

If voyage does not violate capacity of vessel

Add voyage to Voyage Set[vessel]

End If

End For all voyages

End For all vessels in Vessel Set

End for all Vessel Set

Return all Voyage Sets

B_t: بیشینه‌ی ظرفیت خدمت‌رسانی اسکله‌ی پشتیبانی بر حسب تعداد شناور در روز t؛

A_{vir}: برابر با یک اگر شناور v تأسیسات دریایی i را در سفر r بازدید کند و در غیر این صورت صفر.

متغیرهای تصمیم

δ_v: برابر با یک اگر شناور v استفاده شود و در غیر این‌صورت صفر؛

x_{vrt}: برابر با یک اگر شناور v سفر r را در روز t شروع کند و در غیر این‌صورت صفر؛

K: عدد صحیح (شمارنده).

ب) مدل مسئله

$$\text{Min} \sum_{v\in V} C_v^{rc}\delta_v + \sum_{v\in V}\sum_{r\in R_v}\sum_{t\in T} C_{vr}^{sc}x_{vrt} \quad (۱)$$

$$\sum_{v\in V}\sum_{r\in R}\sum_{t\in T} A_{vir}x_{vrt} \geq S_i, \qquad i\in N \quad (۲)$$

$$\sum_{r\in R_v}\sum_{t\in T} D_{vr}x_{vrt} - F_v\delta_v \leq ۰, \qquad v\in V \quad (۳)$$

$$\sum_{v\in V}\sum_{r\in R_v} x_{vrt} \leq B_t, \qquad t\in T \quad (۴)$$

$$\sum_{r\in R_{vl}} x_{vrt} + \sum_{r\in R_v}\sum_{k=۱}^{l-۱} x_{vr((t+k)mod|T|)} \leq ۱ + M\left(۱ - \sum_{r\in R_{vl}} x_{vrt}\right), \quad t\in T,\ v\in V,\ l\in L \quad (۵)$$

$$\sum_{v\in V}\sum_{r\in R_{dp}}\sum_{t\in T} A_{vir}x_{vrt} \geq S_{dp(i)}, \qquad i\in S_{dp(i)} \quad (۶)$$

$$\sum_{v\in V}\sum_{r\in R_v} A_{vir}x_{vrt} \leq ۱, \qquad i\in N,\ t\in T \quad (۷)$$

$$\sum_{v\in V}\sum_{r\in R_v}\sum_{k=۰}^{۲} A_{vir}x_{vr((t+k)mod|T|)} \leq ۱, \qquad i\in N_۲,\ t\in T \quad (۸)$$

$$\sum_{v\in V}\sum_{r\in R_v}\sum_{k=۰}^{۲} A_{vir}x_{vr((t+k)mod|T|)} \geq ۱, \qquad i\in N_۳,\ t\in T \quad (۹)$$

$$\sum_{v\in V}\sum_{r\in R_v}\sum_{k=۰}^{۳} A_{vir}x_{vr((t+k)mod|T|)} \geq ۲, \qquad i\in N_۴,\ t\in T \quad (۱۰)$$

$$\sum_{v\in V}\sum_{r\in R_v}\sum_{k=۰}^{۱} A_{vir}x_{vr((t+k)mod|T|)} \geq ۱, \qquad i\in N_۵,\ t\in T \quad (۱۱)$$

$$\delta_v \in \{۰,۱\}, \qquad v\in V \quad (۱۲)$$

$$x_{vrt} \in \{۰,۱\}, \qquad v\in V,\ r\in R_v,\ t\in T \quad (۱۳)$$

تابع هدف مدل از نوع کمینه‌سازی شامل دو عبارت است که عبارت اول در صورت انتخاب شناور هزینه‌ی اجاره‌ی هفتگی شناور و عبارت دوم در صورت انتخاب سفر هزینه‌ی شناوررانی (هزینه‌ی سوخت) سفر را به تابع هدف اضافه می‌کند. هزینه‌ی اجاره بسیار بیشتر از هزینه‌ی شناوررانی است. بنابراین، هدف اصلی پیداکردن ترکیب بهینه‌ی ناوگان است. رابطه‌ی ۲ اطمینان می‌دهد که تأسیسات تعداد بازدید مورد نیازشان را در یک دوره داشته باشند. رابطه‌ی ۳ تضمین می‌کند که مجموع زمان همه‌ی سفرهایی که یک شناور در یک دوره‌ی شناوررانی می‌کند از بیشینه‌ی زمانی (به روز) که شناور به منظور خدمت‌رسانی در دسترس است، تجاوز نکند و ضمناً

جدول ۲. نتایج عددی روش حل دقیق.

مشخصات مسئله		مشخصات و نتایج روش حل دقیق							
شماره مسئله	n-v-visits-tw-b-pd-npd	سفرهای تولیدشده	زمان تولید سفرها (ثانیه)	زمان حل مدل (ثانیه)	زمان کل (ثانیه)	Opt. gap (٪)	هزینه	شناورهای منتخب	سفرهای منتخب
۱	۱ – ۱ – ۱ – ۱ – ۹ – ۵ – ۴	۸۴	۰٫۰۶	۰٫۳	۰٫۳۶	۰	۹۴۰۳۸	۱	۳
۲	۱ – ۱ – ۱ – ۱ – ۱۲ – ۵ – ۵	۱۸۲	۰٫۰۷	۰٫۳	۰٫۳۷	۰	۹۷۱۴۰	۱	۳
۳	۱ – ۱ – ۲ – ۱ – ۱۶ – ۵ – ۶	۳۴۹	۰٫۰۹	۲٫۵	۲٫۵۹	۰	۱۹۴۶۳۹	۲	۴
۴	۱ – ۱ – ۲ – ۲ – ۲۲ – ۵ – ۷	۶۸۴	۰٫۱	۱٫۸	۱٫۹	۰	۲۰۹۲۶۹	۲	۶
۵	۲ – ۲ – ۲ – ۲ – ۲۸ – ۵ – ۸	۱۵۸۱	۰٫۵	۴	۴٫۵	۰		۲	۶
۶	۲ – ۲ – ۲ – ۲ – ۳۳ – ۵ – ۹	۲۸۸۴	۱٫۹	۲۸	۳۰	۰	۲۷۰۷۷۷	۲	۶
۷	۲ – ۲ – ۲ – ۲ – ۳۸ – ۵ – ۱۰	۵۰۴۵	۶	۱۴۶۲	۱۴۶۸	۰	۳۴۷۸۳۶	۳	۷
۸	۲ – ۲ – ۳ – ۳ – ۴۱ – ۵ – ۱۱	۷۷۴۴	۱۶	۱۲۹	۱۴۵	۰	۳۵۵۷۴۴	۳	۹
۹	۳ – ۳ – ۳ – ۴ – ۴۵ – ۵ – ۱۲	۱۳۳۸۱	۵۴	۷۶۵	۸۱۹	۰	۳۶۸۴۹۶	۳	۶
۱۰	۳ – ۳ – ۳ – ۴ – ۴۹ – ۵ – ۱۳	۱۸۰۳۱	۱۱۶	—	--	—	—	—	—
۱۱	۳ – ۳ – ۳ – ۴ – ۵۵ – ۶ – ۱۴	۴۶۱۱۵	۲۳۵	—	--	—	—	—	—

اگر از شناور v استفاده شده باشد δ_v مقدار یک بگیرد. رابطه‌ی ۴ بیان‌گر این مطلب است که تعداد شناورهای پشتیبانی که در روز t در اسکله‌ی پشتیبانی خدمت‌رسانی می‌شوند از ظرفیت اسکله تجاوز نکند. رابطه‌ی ۵ تضمین می‌کند تا زمانی که شناور به انبار پشتیبانی بازنگشته است، سفر جدیدی را آغاز نکند. این محدودیت به‌این‌صورت عمل می‌کند که مجموع x_{vrt}های روزی که شناور سفر خود را آغاز می‌کند (t) و روزهایی که سفر به‌طول می‌انجامد برابر با یک باشد.

محدودیت ۶ مربوط به بارگیری از یک واحد دریایی به‌منظور تأمین بخشی از تقاضای واحد دریایی دیگر است. این محدودیت اطمینان می‌دهد که تأسیسات مقصد تعداد بازدیدهای مورد نیازشان (S_{dp}) ــ که بخشی از تقاضا از تأسیسات دیگری تأمین می‌شود ــ را داشته باشند. برای هر زوج مبدأ و مقصد این محدودیت وجود دارد.

تعدادی از محدودیت‌ها مربوط به توزیع یکنواخت حرکت‌ها در افق زمانی هستند. این محدودیت‌ها با توجه به تعداد بازدید مورد نیاز واحدهای دریایی در طول دوره تعیین می‌شوند. مجموعه‌های N_2، N_3، N_4 و N_5 شامل تأسیساتی هستند که ۳،۲، ۴ و ۵ بازدید در هفته نیاز دارند.

محدودیت ۷ تضمین می‌کند که در روز t بیشینه‌ی یک حرکت به مقصد واحد دریایی i انجام شود. منظور از حرکت شروع سفر یک شناور از اسکله‌ی پشتیبانی است که در آن سفر واحد دریایی مورد نظر بازدید می‌شود. همین محدودیت برای تأسیساتی که ۶ یا ۷ بازدید در هفته نیاز دارند، کافی است. محدودیت ۸ برای واحدهای دریایی که دو بازدید در هفته نیاز دارند، تضمین می‌کند که در هر سه روز حداکثر یک حرکت وجود داشته باشد. محدودیت ۹ برای واحدهای دریایی که سه بازدید در هفته نیاز دارند، تضمین می‌کند که در هر سه روز حداقل یک حرکت وجود داشته باشد. همچنین محدودیت ۱۰ برای واحدهای دریایی که چهار بازدید در هفته نیاز دارند، تضمین می‌کند که در هر دوره‌ی چهار روزه حداقل دو حرکت وجود داشته باشد و در نهایت محدودیت ۱۱ اطمینان می‌دهد که برای واحدهای دریایی که پنج بازدید در هفته نیاز دارند هر دو روز حداقل یک حرکت وجود داشته باشد. محدودیت‌های ۱۲ و ۱۳ مربوط به متغیرهای صفر و یک هستند. محدودیت‌های پنجره‌ی زمانی، مقدار بارگیری و تحویل، مقدار جابه‌جایی و سفرهای مربوط به جابه‌جایی بین تأسیسات در مرحله‌ی اول (تولید سفرها) اعمال و این محدودیت‌ها در قالب هزینه و توالی تأسیسات هر سفر به مدل ریاضی وارد می‌شوند.

روش حل دقیق ارائه‌شده برای مسائل تا اندازه‌های متوسط شبکه (حدود ۱۲ مشتری) جواب دقیق ارائه می‌دهد. به‌منظور بررسی اعتبار مدل ریاضی مسائل عددی در ابعاد کوچک حل شده است و نتایج در جدول ۲ آمده است.

در بعضی از مناطق نفتی، تعداد واحدهای دریایی موجود در شبکه به بیش از ۳۰ سکو می‌رسد و نیاز به روش‌های دیگری با توانایی حل مسائل برنامه‌ریزی عملیات پشتیبانی در ابعاد بزرگ است. در ادامه روش‌هایی به‌منظور حل ابعاد بزرگ مسئله ارائه می‌شود.

۴. الگوریتم جست‌وجوی ممنوعه

الگوریتم جست‌وجوی ممنوعه با توجه به ویژگی‌هایی مانند سادگی، انعطاف‌پذیری، ثبات و کیفیت جواب‌ها، انتخاب مناسبی برای حل مسائل پیچیده است. براین اساس در طراحی الگوریتم پیشنهادی از چارچوب ارائه شده درجست‌وجوی ممنوعه بهره گرفته شده است.

۱.۴. معرفی الگوریتم

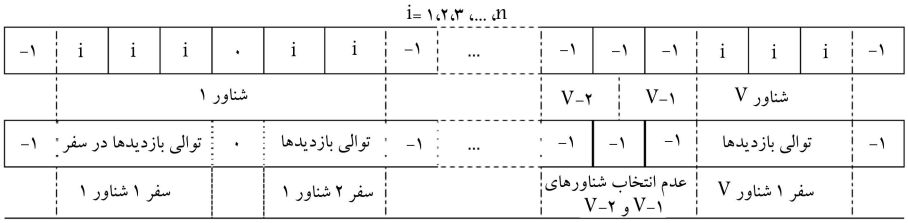
اولین بار توسط گلوور[26] در سال ۱۹۸۶ این الگوریتم را معرفی کرد و نظریات پایه‌ی آن توسط هنسن[27] کامل شد. در ادامه به تشریح الگوریتم جست‌وجوی ممنوعه‌ی ارائه‌شده پرداخته خواهد شد.

۲.۴. طریقه‌ی نمایش جواب و شرایط شدنی‌بودن جواب

با توجه به ویژگی‌ها و محدودیت‌های پیچیده‌کننده‌ی مسئله‌ی برنامه‌ریزی شناورها، تعریف رشته نمایش جواب از اهمیت به‌سزایی برخوردار است. اطلاعاتی مانند شناورهای مورد استفاده، سفرهای مربوط به هر شناور، توالی بازدیدها در هر سفر و زمان حرکت هر سفر اطلاعاتی است که باید توسط رشته نشان داده شود.

محدودیت‌هایی که جواب شدنی نباید از آنها تجاوز کند عبارت‌اند از:

۱. محدودیت ظرفیت شناورها در هر سفر (شناورها غیرمشابه‌اند)؛



شکل ۳. نمایش رشته جواب.

۲. محدودیت مدت زمان هر سفر (تنها سفرهای ۲ و ۳ روزه قابل قبول هستند)؛

۳. محدودیت زمان کل خدمت‌رسانی شناور در دوره؛

۴. محدودیت تعداد بازدید مورد نیاز هر مشتری (دکل عملیاتی، واحد دریایی)؛

۵. محدودیت امکان بارگیری و تحویل بین مشتری‌ها؛

۶. محدودیت ظرفیت اسکله‌ی پشتیبانی؛

۷. محدودیت‌های توزیع یکنواخت حرکت‌ها در دوره.

رشته جواب در شکل ۳ نشان داده شده است که در ادامه به تشریح آن پرداخته می‌شود.

بین دو (۱-) متوالی سفرهایی که به‌وسیله‌ی شناور متناظر شناوررانی خواهد شد، نمایش داده می‌شود. ترتیب اعداد توالی بازدیدها را نشان می‌دهد و عدد صفر نشان‌دهنده‌ی اسکله‌ی پشتیبانی است یعنی سفر به پایان رسیده است و پس از آماده‌سازی، سفر بعدی آغاز خواهد شد. صفر متمایزکننده‌ی سفرهای شناور در دوره است. اگر بین دو (۱-) متوالی عددی وجود نداشته باشد یا تنها صفر بین آنها باشد، یعنی از شناور نظیر استفاده نشده است. این رشته به‌صورت ساده فضای جواب را به‌طور کامل پوشش می‌دهد. برای تمام شناورها، تعداد متفاوت سفر با هر توالی ممکن قابل نمایش است. بیشینه‌ی طول رشته برابر است با:

$$\text{Max array lengh} = \sum_{i=1}^{n} \text{visit}(i) + (V+1) + 2V$$

که عبارت است از:

- مجموع بازدیدهای مورد نیاز تأسیسات دریایی در دوره $(1, ..., n)$؛
- تعداد شناورهایی که می‌توانند انتخاب شوند + ۱ (تعداد منفی یک‌ها)؛
- هر شناور حداکثر می‌تواند ۳ سفر در دوره‌ی یک هفته‌یی شناوررانی کند؛ بنابراین، هر شناور در رشته جواب نیازمند حداکثر دو صفر است. اگر تمام شناورها در جواب اولیه استفاده شوند دوبرابر تعداد شناورها صفر موجود خواهد بود.

تنها ویژگی که از نمایش آن در رشته جواب به‌دلیل پیچیدگی اجتناب شده زمان شروع هر سفر است به‌طوری‌که محدودیت‌های ظرفیت اسکله و توزیع یکنواخت حرکت‌ها در دوره رعایت شوند. شدنی‌بودن جواب با استفاده از یک مدل تخصیص سفرها به روزهای دوره (بدون تابع هدف با محدودیت‌های ظرفیت اسکله و توزیع یکنواخت حرکت‌ها) به راحتی و در زمان بسیار کمی قابل بررسی است.

۳.۴. ایجاد جواب اولیه

با توجه به پیچیدگی و محدودیت‌های زیاد مسئله نیاز به روش ساده‌یی برای ایجاد یک جواب شدنی است. در اینجا جواب اولیه با استفاده از الگوریتم نزدیک‌ترین همسایگی[۲۸] به‌گونه‌یی که هیچ محدودیتی نقض نشود، ایجاد می‌شود.

۴.۴. سازوکار ایجاد همسایگی

در این مرحله تمام همسایگی‌های منحصربه‌فردی که به‌وسیله‌ی عملگرهای جابه‌جایی[۲۹]، تعویض[۳۰] و 2-opt ایجاد می‌شوند، در یک فهرست ذخیره می‌شوند.

۵.۴. ارزیابی جواب‌های همسایه و انتخاب جواب مناسب

برای هر همسایگی معیار هزینه ــ شامل هزینه‌ی اجاره‌ی شناورها و شناوررانی سفرها ــ محاسبه می‌شود. با توجه به تعداد بسیار زیاد همسایگی‌های تولیدشده زمان زیادی برای محاسبه‌ی معیار هزینه‌ی تمام همسایگی‌ها لازم است. از طرفی چون بسیاری از همسایگی‌ها به یکدیگر نزدیک هستند، الگوریتم در یک بهینه‌ی محلی به دام می‌افتد به‌طوری‌که تعداد تکرار زیادی برای خروج از آن لازم است. برای غلبه بر این مشکل از راهبرد فهرست گزینه‌ها استفاده شده است. این راهبرد به‌طور مؤثری زمان مورد نیاز هر تکرار الگوریتم و همچنین سرعت حرکت الگوریتم (تعداد تکرارهای لازم برای رسیدن به جواب) را بهبود می‌بخشد.

این راهبرد این‌گونه پیاده‌سازی می‌شود که از فهرست همسایگی‌های تولیدشده در مرحله‌ی قبل یک عدد تصادفی انتخاب می‌شود و از آن همسایگی به اندازه‌ی طول فهرست گزینه‌ها، همسایگی‌های پس از آن ارزیابی می‌شوند و بهترین آنها به‌عنوان جواب جدید انتخاب می‌شود.

۶.۴. بهنگام‌سازی جواب‌ها و فهرست ممنوعه

در هر تکرار الگوریتم بهترین همسایگی یافته‌شده از فهرست گزینه‌ها به‌عنوان جواب فعلی[۳۱] انتخاب و همسایگی‌های آن تولید می‌شوند.

عملگر تولید آن همسایگی در فهرست ممنوعه قرار می‌گیرد. به‌منظور پیاده‌سازی ممنوعیت از سیاست FIFO [۳۲] استفاده شده است.

۷.۴. جست‌وجوی محلی

تاکنون بهترین جوابی که تمام محدودیت‌ها به‌جز محدودیت ظرفیت اسکله و محدودیت‌های توزیع یکنواخت حرکت‌ها را ارضا می‌کند، به‌دست آمده است.

در این مرحله از راهبرد مجوزدادن به جواب‌های نشدنی استفاده می‌شود به‌این‌صورت که پس از بررسی سایر محدودیت‌های پیشین برای هر همسایگی، یک مدل تخصیص بدون تابع هدف و با محدودیت‌های[۳۳] نظیر ۴ ظرفیت اسکله، ۵ بازگشت شناور قبل از شروع سفر جدید و محدودیت‌های (۷ الی ۱۱) که مربوط به توزیع یکنواخت حرکت‌ها هستند، حل می‌شود. پس از حل مدل، اگر جواب شدنی یافت نشد مقداری به‌عنوان جریمه به هزینه‌ی به‌دست‌آمده برای این جواب اضافه می‌شود. بنابراین، الگوریتم در همسایگی‌های بهترین جواب به جست‌وجوی یک جواب شدنی با هزینه‌ی قابل قبول می‌پردازد.

۸.۴. شرط توقف

برای توقف الگوریتم از دو شرط زیر استفاده شده است:

۱. در مرحله‌ی جست‌وجوی محلی، جوابی حاصل شود که تفاوت هزینه‌ی آن از کران پایین کمتر از gap شود. مقدار gap از پارامترهای مسئله است و مقدار آن می‌تواند به‌صورت چند در صد کران پایین باشد. کران پایین بهترین جواب یافت‌شده قبل از جست‌وجوی محلی است.

۲. تعداد تکرارهای کلی جست‌وجوی محلی به تعداد معینی برسد. در این صورت بهترین جواب شدنی به‌دست‌آمده ارائه می‌شود.

۵. الگوریتم ابتکاری

الگوریتم فراابتکاری ارائه‌شده با وجود داشتن نقاط قوت متعدد، در بعضی از مسائل حل‌شده در مواقعی که خطای کمی باعث اضافه‌کردن یک شناور به شبکه می‌شود و جواب بهینه در مرز حساسی قرار دارد خطای زیادی نسبت به مقدار بهینه نشان می‌دهد؛ به‌علاوه، برای حل مسائلی با اندازه‌های بزرگ شبکه نیازمند زمان زیادی (بیش از ۱۰۰۰۰ ثانیه) برای حل است. به‌همین دلیل یک الگوریتم ابتکاری که ترکیبی از روش دقیق و روش فراابتکاری است ارائه شده که از دقت و زمان حل خوبی برای حل مسئله برخوردار است.

این روش به‌این‌صورت است که پس از تکرارهای مرحله‌ی اول الگوریتم جست‌وجوی ممنوعه‌ی ارائه‌شده در قسمت ۵ و قبل از اجرای جست‌وجوی محلی، تعداد n جواب از بهترین جواب‌های به‌دست‌آمده را ذخیره می‌کند و از سفرهای تشکیل‌دهنده‌ی آن‌ها به‌عنوان ورودی برای مرحله‌ی دوم روش دقیق ارائه‌شده در قسمت ۲.۳. استفاده می‌کند و با حل مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح جواب نزدیک بهینه را در زمان مناسب ارائه می‌دهد. در ادامه به تشریح روش حل ابتکاری می‌پردازیم.

۱.۵. گام‌های الگوریتم ابتکاری ارائه شده

۱.۱.۵. مرحله‌ی اول: تولید سفر

به‌منظور تولید سفرهای بهینه که تشکیل‌دهنده‌ی جواب مسئله خواهند بود، طبق گام‌های زیر عمل می‌شود:

گام ۱. اجرای الگوریتم جست‌وجوی ممنوعه‌ی ارائه‌شده بدون محدودیت‌های ظرفیت اسکله و توزیع یکنواخت حرکت‌ها؛

گام ۲. ذخیره‌ی n جواب از بهترین جواب‌های یافته‌شده (n پارامتر الگوریتم برابر با ۱۰۰۰)؛

گام ۳. جداسازی سفرهای تشکیل‌دهنده‌ی این جواب‌ها و ذخیره به عنوان زیرمجموعه‌هایی از شبکه؛

گام ۴. حذف زیرمجموعه‌های تکراری؛

گام ۵. حل TSP با پنجره‌ی زمانی برای هر زیرمجموعه‌ی منحصربه‌فرد؛

گام ۶. انتخاب زیرمجموعه‌های مناسب برای بارگیری و تحویل بین مشتری‌ها؛

گام ۷. حل TSP با پنجره‌ی زمانی برای زیرمجموعه‌های گام ۶، به‌شرطی که مشتری مبدأ قبل از مشتری مقصد بازدید شود؛

گام ۸. ساختن مجموعه سفرهای هر شناور بدین‌صورت که اگر ظرفیت مورد نیاز هر سفر از ظرفیت شناور مورد نظر تجاوز نکند، آن سفر به مجموعه سفرهای شناور اضافه می‌شود؛

۲.۱.۵. مرحله‌ی دوم: حل مدل بر پایه‌ی سفر

گام ۹. سفرهای تولیدشده به‌عنوان ورودی به مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح ارائه‌شده در قسمت ۲.۳. داده می‌شوند و با حل مدل جواب حاصل می‌شود.

۶. نتایج عددی و ارزیابی روش‌های حل

در این بخش روش حل‌های ارائه‌شده به‌وسیله‌ی نمونه‌های واقعی از مسئله‌ی برنامه‌ریزی شناورهای پشتیبانی ارزیابی می‌شوند. مسائل نمونه به‌گونه‌یی ارائه شده‌اند که حالت عمومی داشته و نمایانگر شرایط واقعی مسئله باشند. برای استفاده در شرایط واقعی ابتدا بدون لحاظ‌کردن جریانات برگشتی و جابه‌جایی بین واحدهای دریایی و با یک فاکتور اضافی ۲۰٪ (به‌منظور اطمینان بیشتر) مسئله حل می‌شود و شناورها انتخاب می‌شوند. این تصمیم راهبردی تا زمانی‌که تغییرات مهمی (اضافه‌شدن یک واحد دریایی به شبکه، تغییر عملیات یک واحد از حفاری به استخراج و...) در شبکه صورت نگیرد، معتبر خواهد بود. سپس برای هر هفته مطابق با شرایط عملی، مسئله حل می‌شود و مسیرها و زمان‌بندی‌ها مشخص می‌شوند (سطح تاکتیکی).

در مسائل ارائه‌شده اندازه‌ی شبکه از ۴ تا ۱۴ واحد دریایی متنوع است. تعداد بازدیدهای هفتگی هر واحد دریایی در دوره بین ۱ تا ۶ بازدید و تقاضای هفتگی واحدهای دریایی از ۲۵۰ تا ۹۰۰ مترمربع است. زمان تخلیه و بارگیری شناورها در واحدهای دریایی متناسب با حجم تقاضا و جریان برگشتی هر بازدید از ۲ تا ۷ ساعت متفاوت است. برای مسائل حداقل ۵ شناور در دسترس برای اجاره در نظر گرفته شده است که ظرفیت عرشه‌ی آنها از ۶۰۰ تا ۱۰۶۰ مترمربع متفاوت است و هزینه‌ی اجاره‌ی هفتگی آنها وابسته به ظرفیت و دیگر قابلیت‌های شناور است و از ۷۰ هزار تا ۱۳۰ هزار دلار است.

نتایج بر روی رایانه‌یی با پردازنده‌ی intel Core i5@۲/۶۷ GHz و حافظه‌ی ۴GB انجام شده‌است. مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح در محیط نرم‌افزار GAMS ۲۴ و با استفاده از حل‌کننده‌ی CPLEX و همچنین الگوریتم تولید سفرها و الگوریتم فراابتکاری به زبان C# با استفاده از نرم‌افزار Visual Studio ۲۰۱۳ نوشته و اجرا شده است.

۱.۶. نتایج عددی حاصل از روش حل دقیق

نتایج به‌دست آمده از حل مسائل ارائه‌شده در جدول ۲ نشان داده شده است. مشخصات مسئله به‌صورت n-v-visits-tw-b-pd-npd نمایش داده شده است که به‌ترتیب n تعداد واحدهای دریایی (مشتری‌ها)، v تعداد شناورهایی که می‌توانند انتخاب شوند، visits مجموع بازدیدها، tw تعداد واحدهای دریایی که به پنجره‌ی زمانی محدود شده‌اند، b تعداد واحدهای دریایی که جریان برگشتی آنها از تقاضایشان بیشتر است، pd تعداد زوج واحدهایی که بین آنها بارگیری و تخلیه صورت می‌گیرد و npd تعداد این بازدیدهای خاص در دوره است. همچنین مشخصات و نتایج روش حل شامل تعداد سفرهای تولیدشده و زمان تولید آنها، زمان حل مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح بر اساس سفرها، زمان کل، هزینه‌ی دوره، تعداد شناورها و تعداد سفرهای انتخاب‌شده است. در این مسائل max.CPU time برابر با ۱۵۰۰۰ ثانیه در نظر گرفته شده است.

نتایج ارائه شده در جدول ۲ ، توانایی روش حل دقیق برای مسائلی تا ابعاد بیشینه دوازده واحد دریایی را نشان می دهد.

۲.۶. ارزیابی روش‌های حل ابتکاری و فرابتکاری

به‌منظور ارزیابی روش‌های حل تقریبی، مسائل ارائه‌شده در جدول ۲ اجرا شده و نتایج حاصل با روش دقیق مقایسه می‌شود. همچنین با طرح مسائلی در ابعاد بزرگ و مقایسه‌ی نتایج حاصل از دو روش کارایی روش‌های فرابتکاری و ابتکاری بررسی می‌شود. جدول ۳ نتایج حاصل از حل مسائل با ابعاد کوچک و متوسط توسط الگوریتم فرابتکاری و ابتکاری را نشان می‌دهد.

نتایج حاصل از حل مسائل ابعاد بزرگ در جدول ۴ نشان داده شده است. در این مسائل الگوریتم جست‌وجوی ممنوعه پس از اجرای ۵۰ تکرار متوقف شده است.

الگوریتم جست‌وجوی ممنوعه در بیشتر مسائل جدول ۳ کارایی قابل قبولی نشان داده است. اما در تعدادی از مسائل (۶ و ۹) جواب‌هایی با خطای زیاد ارائه می‌دهد که به‌دلیل قرارگرفتن جواب بهینه در یک مرز حساس است به‌طوری‌که جواب با خطای کم در مسیریابی سبب اضافه‌کردن یک شناور به جواب می‌شود و بیشتر این خطا مربوط به هزینه‌ی شناور اضافه شده است. همچنین در ابعاد بزرگ مسئله (جدول ۴) زمان حل قابل قبولی ندارد. روش ابتکاری که می‌توان آن را الگوریتم جست‌وجوی ممنوعه‌ی بهبودیافته نامید این معایب را برطرف کرده و کارایی مناسبی در حل مسائل ارائه داده است. بیشتر زمان حل در روش جست‌وجوی ممنوعه مربوط به مرحله‌ی جست‌وجوی محلی است که این مرحله در روش ابتکاری اجرا نمی‌شود. تنها روش حل ابعاد بزرگ این مسئله بدون جریان برگشتی و جابه‌جایی بین تأسیسات الگوریتم جست‌وجوی همسایگی ارائه شده به‌وسیله‌ی شایشو و همکاران است که زمان حل آن در جدول ۵ نشان داده شده است.[۲۰]

جدول ۳. نتایج روش فرابتکاری و ابتکاری و مقایسه‌ی آنها با روش دقیق $\delta < ۰/۱$.

مشخصات مسئله		الگوریتم جست‌وجوی ممنوعه				روش ابتکاری		
شماره مسئله	n-v-visits-tw-b-pd-npd	زمان متوسط (s)	خطای بهترین جواب (درصد)	خطای متوسط	شناور مازاد	زمان متوسط (s)	خطای بهترین جواب (درصد)	خطای متوسط
۱	۱ – ۱ – ۱ – ۹ – ۵ – ۴	۶/۷	δ	δ	۰	۱/۶	۰	۰
۲	۱ – ۱ – ۱ – ۱۲ – ۵ – ۵	۹/۷	δ	δ	۰	۲/۴	۰	δ
۳	۱ – ۱ – ۲ – ۱ – ۱۶ – ۵ – ۶	۱۵	δ	δ	۰	۳/۴	۰	۰
۴	۱ – ۱ – ۲ – ۲ – ۲۲ – ۵ – ۷	۲۹/۵	δ	δ	۰	۵/۱	۰	۰
۵	۲ – ۲ – ۲ – ۲ – ۲۸ – ۵ – ۸	۴۱/۵	δ	۰/۳	۰	۷/۷	۰	۰
۶	۲ – ۲ – ۲ – ۲ – ۳۳ – ۵ – ۹	۶۹	۲۳	۲۵	۱	۳۵	۰	۰/۲
۷	۲ – ۲ – ۲ – ۲ – ۳۸ – ۵ – ۱۰	۷۴	δ	۱	۰	۶۰	۰	δ
۸	۲ – ۲ – ۳ – ۳ – ۴۱ – ۵ – ۱۱	۲۶۰	۱	۳	۰	۸۵	۰	δ
۹	۳ – ۳ – ۳ – ۴ – ۴۵ – ۵ – ۱۲	۲۲۲	۳۰	۳۳	۱	۱۸۴	۰/۲	۰/۴
برای ابعاد بزرگتر از ۱۲ گره جواب دقیق موجود نیست.		زمان متوسط (ثانیه)	بهترین هزینه (دلار)	هزینه متوسط	درصد اختلاف	زمان متوسط (ثانیه)	بهترین هزینه (دلار)	متوسط هزینه
۱۰	۳ – ۳ – ۳ – ۴ – ۴۹ – ۵ – ۱۳	۵۰۷	۴۸۶۳۵۴	۴۹۶۴۹۷	۰/۸	۴۲۰	۴۸۲۳۶۲	۴۸۵۱۶۳
۱۱	۳ – ۳ – ۳ – ۴ – ۵۵ – ۶ – ۱۴	۸۳۶	۵۰۳۶۴۵	۵۲۸۹۲۴	۱/۷	۵۸۳	۴۹۴۹۸۶	۴۹۷۷۳۴

جدول ۴. نتایج مسائل برنامه‌ریزی شناورهای پشتیبانی در ابعاد بزرگ.

مشخصات مسئله		الگوریتم جست‌وجوی ممنوعه				الگوریتم ابتکاری		
شماره مسئله	n-v-visits-tw-b-pd-npd	زمان (ثانیه)	هزینه (دلار)	شناور سفر	اختلاف از بهترین جواب	زمان (ثانیه)	هزینه (دلار)	شناور سفر
۱۲	۳ – ۳ – ۳ – ۵۸ – ۱۰ – ۱۵	۱۰۸۰	۴۹۴۴۲۱	۱۲ – ۴	۰/۷٪ – ۳۵۷۶	۶۳۴	۴۹۰۸۴۵	۱۰ – ۴
۱۳	۴ – ۴ – ۴ – ۷۵ – ۱۰ – ۲۰	۲۸۵۰	۶۲۹۵۰۴	۱۳ – ۵	۰/۸٪ – ۳۹۹۰	۷۰۱	۶۲۵۵۱۴	۱۳ – ۵
۱۴	۵ – ۵ – ۵ – ۹۱ – ۱۰ – ۲۵	۱۵۷۰۰	۸۵۴۶۲۴	۱۸ – ۶	۹/۱٪ – ۷۱۶۰۴	۷۹۲	۷۸۳۰۲۰	۱۶ – ۶
۱۵	۵ – ۵ – ۵ – ۹۵ – ۱۰ – ۲۶	—	—	—	—	۸۴۹	۷۸۹۵۲۴	۱۷ – ۶
۱۶	۶ – ۶ – ۵ – ۵ – ۱۰۰ – ۱۰ – ۲۷	—	—	—	—	۹۲۰	۸۰۴۱۹۵	۱۸ – ۶
۱۷	۶ – ۶ – ۶ – ۵ – ۱۰۳ – ۱۰ – ۲۸	—	—	—	—	۹۹۸	۸۳۴۴۵۴	۱۸ – ۶
۱۸	۶ – ۶ – ۶ – ۶ – ۱۰۷ – ۱۰ – ۲۹	—	—	—	—	۱۰۱۱	۹۵۸۶۸۰	۱۹ – ۷
۱۹	۶ – ۶ – ۶ – ۶ – ۱۱۱ – ۱۰ – ۳۰	—	—	—	—	۱۰۱۳	۹۷۳۱۲۵	۲۰ – ۷
۲۰	۶ – ۶ – ۶ – ۶ – ۱۱۳ – ۱۰ – ۳۱	—	—	—	—	۱۰۸۰	۹۷۴۳۴۷	۲۰ – ۷
۲۱	۶ – ۶ – ۶ – ۶ – ۱۱۵ – ۱۰ – ۳۲	—	—	—	—	۱۱۳۳	۹۸۴۷۹۲	۲۱ – ۷
۲۲	۷ – ۷ – ۷ – ۷ – ۱۱۷ – ۱۰ – ۳۳	—	—	—	—	۱۳۷۸	۱۱۳۳۹۱۳	۲۲ – ۸

جدول ۵. نتایج الگوریتم جست‌وجوی همسایگی شایشو و همکاران.[۲۰]

مشخصات مسئله n-v-visits-tw	تعداد شناورها	تعداد سفرها	زمان حل (ثانیه)
۵ – ۹۴ – ۱۱ – ۲۶	۶	۱۴	۱۲۷۱۲
۵ – ۹۸ – ۱۱ – ۲۷	۷	۱۵	۱۰۴۰۳
۵ – ۱۰۲ – ۱۱ – ۲۸	۷	۱۷	۲۲۵۸۴
۵ – ۱۰۸ – ۱۱ – ۲۹	۷	۱۷	۱۰۳۶۶
۵ – ۱۱۴ – ۱۱ – ۳۰	۷	۱۸	۱۲۱۴۸
۶ – ۱۱۵ – ۱۱ – ۳۱	۷	۱۸	۱۴۵۵۷

۷. نتیجه‌گیری

در این پژوهش مسئله‌ی برنامه‌ریزی شناورهای پشتیبانی با شرایط دنیای واقعی مانند پنجره‌ی زمانی، جریان برگشتی، امکان بارگیری و تحویل بین تأسیسات دریایی و توزیع یکنواخت حرکت‌ها در دوره مدل شد و یک روش حل دقیق دومرحله‌یی شامل: الف) تولید سفر و ب) حل مدل عدد صحیح بر پایه‌ی سفرهای تولیدشده ارائه شد. روش حل دقیق توانایی حل مسئله تا ابعاد متوسط را داراست. برای ابعاد بزرگ‌تر مسئله، الگوریتم فراابتکاری جست‌وجوی ممنوعه و الگوریتم ابتکاری ارائه شده است. الگوریتم ابتکاری در مقایسه با روش دقیق (در مسائل کوچک و متوسط) از خطای کمتر از ۰٫۵٪ برخوردار است و زمان حل آن در ابعاد بزرگ مسئله (حداکثر ۱۴۰۰ ثانیه) به مراتب از روش فراابتکاری بهتر است. نوآوری‌های مقاله شامل ملاحظه‌ی جریان برگشتی و امکان جابه‌جایی بین تأسیسات و ارائه الگوریتم فراابتکاری جست‌وجوی ممنوعه و الگوریتم ابتکاری است. با توجه به هزینه‌های زیاد شناورهای پشتیبانی بهره‌گیری از سیاست برنامه‌ریزی حاصل از این تحقیق می‌تواند صرفه‌جویی زیادی را در لجستیک بالادست صنعت نفت‌وگاز در پی داشته باشد.

عدم قطعیت از ویژگی‌های مهم این مسئله‌ی عملیاتی است که به‌دلیل ماهیت تصادفی عملیات‌ها و ناپایداری شرایط جوی منطقه عملیاتی به‌وجود می‌آید. در مطالعات آینده تمرکز بر عدم قطعیت داده‌ها حائز اهمیت خواهد بود. همچنین در نظر گرفتن مسئله با چندین اسکله‌ی پشتیبانی و توسعه‌ی الگوریتم‌های جدید می‌تواند بررسی شود.

منابع (References)

1. Iachan, R. "A Brazilian experience: 40 years using operations research at Petrobras", *International Transactions in Operational Research*, **16**(5), pp. 585-59 (2009).
2. Halvorsen-Weare, E.E., Fagerholt, K., Nonas, L.M. and Asbjornslett, B.E. "Optimal fleet composition and periodic routing of offshore supply vessels", *European Journal of Operational Research,* **223**(2), pp. 508-517 (2012).
3. Spiegel, T. and Caulliraux, H.M. "An application of design research to an offshore-supply port operatio", *Modern Management Science & Engineering*, **1**(2), pp. 209-228 (2013).
4. Toth, P. and Vigo, D., *The Vehicle Routing Problem*, Siam, Society for Industrial and Applied Mathematics Philadelphia, PA, USA, 367 p. (2001).
5. Christiansen, M., Fagerholt, K., Nygreen, B. and Ronen, D. "Maritime transportation", *Handbooks in Operations Research and Management Science*, **14**, pp. 189-284 (2006).
6. Golden, B., Assad, A., Levy, L. and Gheysens, F. "The fleet size and mix vehicle routing problem", *Computers & Operations Research,* **11**(1), pp. 49-66 (1984).
7. Fagerholt, K. "Optimal fleet design in a ship routing problem", *International Transactions in Operational Research*, **6**(5), pp. 453-464 (1999).
8. Hoff, A., Andersoon, H., Christiansen, M., Hasle, G. and Lokketangen, A. "Industrial aspects and literature survey: Fleet composition and routing", *Computers & Operations Research*, **37**(12), pp. 2041-2061 (2010).
9. Soonpracha, K., Mungwattana, A. Janssens, G.K. and Manisri, T. "Heterogeneous VRP review and conceptual

پانوشت‌ها

1. supply vessel planning problem (SVPP)
2. route
3. offshore logistic
4. vehicle routing problem (VRP)
5. periodic
6. time windows
7. heterogeneous fleet
8. simultaneous delivery and pickup
9. spread of departures
10. opening hours
11. Bulk
12. fleet size and mix vehicle routing problems (FSMVRP)
13. Heterogeneous fleet vehicle routing problem
14. Hokey
15. vehicle routing problemwith simultaneous pickup and delivery and time windows
16. pickup and delivery problem with time windows
17. home health care logistic
18. Statoil
19. Campos Basin
20. discrete event
21. arctic
22. fuel supply vessel
23. Hellenic oil company
24. travelling salesman problem
25. voyage base model
26. Glover
27. Hansen
28. nearest neigbourhood
29. relocation
30. swap
31. current solution
32. first in first out

۳۳. محدودیت‌هایی از مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح که در بخش ۲.۳. ارائه شده است.

framework", in *Proceedings of the International Multi-Conference of Engineers and Computer Scientists*, **II**, pp. 1-8 (2014).

10. Francis, P.M., Smilowitz, K.R. and Tzur, M. "The period vehicle routing problem and its extensions", *The Vehicle Routing Problem: Latest Advances and New Challenges*, Springer, pp. 73-102 (2008).
11. Beltrami, E.J. and Bodin, L.D. "Networks and vehicle routing for municipal waste collection", *Networks*, **4**(1), pp. 65-94 (1974).
12. Campbell, A.M. and Wilson, J.H. "Forty years of periodic vehicle routing", *Networks*, **63**(1), pp. 2-15 (2014).
13. Min, H. "The multiple vehicle routing problem with simultaneous delivery and pick-up points", *Transportation Research Part A: General*, **23**(5), pp. 377-386 (1989).
14. Liu, R., Xie, X., Augusto, V. and Rodriguez, C. "Heuristic algorithms for a vehicle routing problem with simultaneous delivery and pickup and time windows in home health care", *European Journal of Operational Research*, **230**(3), pp. 475-486 (2013).
15. Wang, C., Mu, D., Zhao, F. and Sutherland, J.W. "A parallel simulated annealing method for the vehicle routing problem with simultaneous pickup–delivery and time windows", *Computers & Industrial Engineering*, **83** pp. 111-122 (2015).
16. Cai, Y.G., Tang, Y.L. and Yang, Q.J. "An improved genetic algorithm for multi-depot heterogeneous vehicle routing problem with simultaneous pickup and delivery time windows", in *Applied Mechanics and Materials*, Trans Tech Publ, pp. 361-365 (2015).
17. Fagerholt, K. and Lindstad, H. "Optimal policies for maintaining a supply service in the Norwegian Sea", *Omega*, **28**(3), pp. 269-275 (2000).
18. Aas, B., Halskau Sr, O. and Shlopak, A. "Routing of supply vessels to petroleuminstallations", *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, **37**(2), pp. 164-179 (2007).
19. Aas, B., Halskau Sr, O. and Wallace, S.W. "The role of supply vessels in offshore logistics", *Maritime Economics & Logistics*, **11**(3), pp. 302-325 (2009).
20. Shyshou, A., Gribkovskaia, I., Laporte, G. and Fagerholt, K. "A large neighbourhood search heuristic for a periodic supply vessel planning problem arising in offshore oil and gas operations", *INFOR: Information Systems and Operational Research*, **50**(4), pp. 195-20 (2013).
21. Maisiuk, Y. and Gribkovskaia, I. "Fleet sizing for offshore supply vessels with stochastic sailing and service times", *Procedia Computer Science*, **31**, pp. 939-948 (2014).
22. Sopot, E. and Gribkovskaia, I. "Routing of supply vessels to with deliveries and pickups of multiple commodities", *Procedia Computer Science*, **31**, pp. 910-917 (2014).
23. Milaković, A.-S., Ulstein , M., Bambulyak, A. and Ehlers, S. "Optimization of OSV fleet for an offshore oil and gas field in the russian arctic", in *ASME 2015 34th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*, American Society of Mechanical Engineers (2015).
24. Christiansen, M., Fagerholt, K., Rachaniotis, N.P., Tveit, I. and Overdal, M.V. "A decision support model for routing and scheduling a fleet of fuel supply vessels", in *Computational Logistics*, Springer, pp. 46-60 (2015).